

# 真空导入模塑工艺树脂流动行为研究进展

杨金水 肖加余 曾竟成 彭超义

(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

**文 摘** 综述了近年来真空导入模塑工艺树脂流动行为的研究进展,结合自己的研究成果系统地评述了真空导入模塑工艺中树脂的流动模型及机理、流动行为的数值模拟和流动行为的监测控制,并在此基础上对真空导入模塑工艺树脂流动行为的研究前景进行了展望。

**关键词** 真空导入模塑工艺,导流介质,流动行为,数值模拟

## Review on Resin Flow Behavior in Vacuum Infusion Molding Process

Yang Jinshui Xiao Jiayu Zeng Jingcheng Peng Chaoyi

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** The research progress of resin flow behavior in vacuum infusion molding process is reviewed. The flow mechanism of resin, the numerical simulation of resin flow behavior and control of the vacuum infusion molding process are discussed in detail. The study prospective of resin flow behavior in vacuum infusion molding process is proposed.

**Key words** Vacuum infusion molding process, Distribution medium, Flow behavior, Numerical simulation

### 0 引言

真空导入模塑工艺(VMP)是在RTM工艺基础上发展起来的一种先进复合材料低成本液体模塑成型技术,近年来已广泛应用于机舱罩、汽车壳体、船体、桥体和风电叶片等大型复合材料构件的整体成型制备<sup>[1]</sup>。其工艺原理是在单面刚性模具上以柔性真空袋膜包覆、密封纤维增强材料,真空负压下排除模腔中的气体,利用树脂的流动、渗透实现树脂对纤维及其织物的浸渍,并固化成型复合材料构件<sup>[2-3]</sup>。

VMP工艺封装原理见图1。

VMP工艺利用真空负压吸注树脂,吸注压力0.10 MPa,树脂流动速率往往难以满足工艺成型要求,通常需要在预成型体表面铺放高渗透率导流介质来提高其流动速率,导流介质和预成型体之间用一层很薄的低孔隙率、低渗透率的脱模布隔离<sup>[2,4]</sup>。树脂同时在两种渗透率差别很大的多孔介质(导流介质和增强材料预成型体)中流动,流动速率存在较大差异,这种差异会影响树脂沿z向的流动浸渍行为,使VMP工艺的树脂流动行为较之传统RTM工艺更为复杂<sup>[5-6]</sup>。此外,VMP工艺采用柔性真空袋膜封装,柔性袋膜的约束性差,树脂注射过程中体系压力分布

的变化容易导致增强材料预成型体的变形,进而影响预成型体的渗透率和树脂的流动浸渍行为。

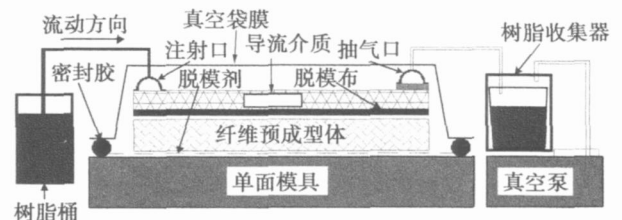


图1 VMP工艺封装原理示意图

Fig 1 Schematic of VMP setup

基于RTM工艺的树脂流动模型及机理、流动行为的数值模拟和流动行为的监测控制等理论无法准确地描述VMP工艺的树脂流动行为。为了进一步掌握VMP工艺树脂流动行为。本文结合自己的研究结果,对国内外的研究进展进行分析评述。

### 1 真空导入模塑工艺树脂渗流机理及模型

#### 1.1 渗流机理

真空导入模塑工艺的本质是流体长程渗流浸渍多孔介质的过程。流体在多孔介质中的渗流机理,最早的研究源于19世纪法国物理学家Darcy对土壤中液体渗流过程的研究,并于1856年发表著名的Darcy

收稿日期:2009-07-27;修回日期:2009-08-28

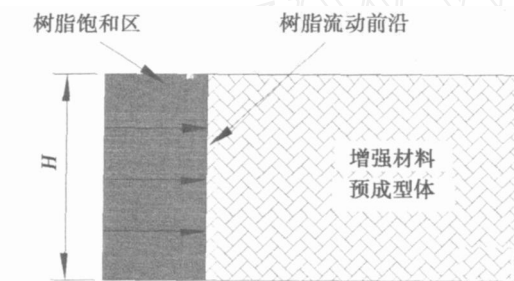
基金项目:国家“863”项目(2007AA03Z563)及湖南省重大科技专项(2006GK1002)资助

作者简介:杨金水,1982年出生,博士研究生,主要从事聚合物基复合材料研究。E-mail: xjtujinshui@yahoo.com.cn

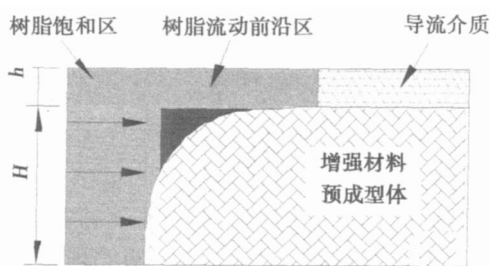
定律<sup>[7-8]</sup>, Darcy定律总结了渗流量与渗流速率的关系。1927年, Kozeny建立了流道理论<sup>[9-10]</sup>, 与 Darcy定律不同, Kozeny认为多孔介质具有能够被具体数学几何模型替代的特定细节结构, 并考虑了毛细作用力的影响。在此基础上, Caman提出了 Kozeny - Caman方程<sup>[9]</sup>来预测预成型体的渗透率。B rinkman提出了 B rinkman方程<sup>[9-11]</sup>, 方程考虑了预成型体的不连续性或模腔壁的边缘效应可能产生的非均匀性, 能够很好地描述在注射口和多孔区域之间存在边界时多孔介质周围的流动行为。Navier和 Stokes针对增强材料预成型体和模腔壁间敞口流道的流动提出了 Navier - Stokes方程<sup>[9-11]</sup>, 为研究液体模塑成型工艺中的边缘效应提供了理论依据。后来的研究者在上述渗流定律的基础上, 结合守恒定律探索流体渗流的力学机理, 推导出渗流连续性方程、运动方程和温度方程等流体流动控制方程<sup>[12-13]</sup>。

## 1.2 渗漏流动模型

真空导入模塑工艺中, 导流介质是高渗透性多孔介质, 渗透率通常比纤维预成型体大 2~3 个数量级 (图 2)。



(a) 传统 RTM 工艺



(b) VMP 工艺

图 2 树脂流动模式示意图

Fig 2 Schematic of resin flow model

树脂同时在渗透率差别很大的导流介质和预成型体中流动, 导流介质中的流动速率远大于预成型体中的流动速率, 导流介质中的树脂流动前锋迅速超前于预成型体中的流动前锋, 同时树脂沿厚度方向不断从导流介质向预成型体渗流完成浸渍过程, 据此流动特点 S Xiudong<sup>[14]</sup>等提出了 VMP 工艺的流动模型, 将树脂在导流介质中的流动看作是一种存在垂直渗流的平面流动, 简称渗漏模型。结合 Darcy 定律和渗流量的计算方程<sup>[4, 6, 14]</sup>建立树脂渗漏流动有限元数值

模拟模型来预测树脂的流动行为, 由此确定 VMP 充模过程中树脂的流动模式 [图 2(b)], 与 RTM 工艺相比有明显差别。

导流介质辅助改变了树脂在预成型体中的流动模式, 同时也影响树脂的充模流动速率。S Xiudong<sup>[14]</sup>, A. Hammani<sup>[15-16]</sup>, R. Mathur<sup>[17]</sup> 和 Z Yingdan<sup>[4]</sup>等通过实验得出: 导流介质的渗透率决定着树脂充模流动时间, 而纤维增强材料的渗透率不起决定作用。笔者的研究表明, VMP 工艺真空袋膜密封模腔内的等效渗透率并不是导流介质和增强材料预成型体两者渗透率的简单混合, 即并不遵守混合定律; 而且, 随着预成型体厚度的增加, 导流介质对树脂流动充模流动速率的影响减小, 导流介质的渗透率对充模流动时间的决定作用减弱。

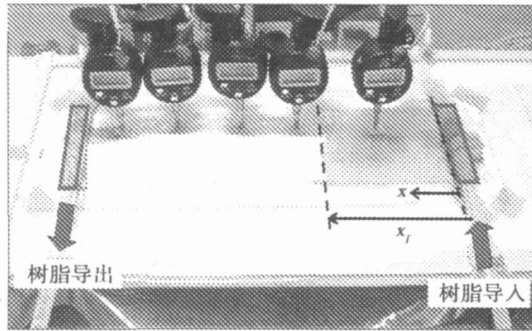
## 2 真空导入模塑工艺树脂流动行为的数值模拟

树脂在多孔介质中的流动是复杂的瞬态三维渗流过程, 其中具有力、热的耦合效应, 数值模拟不仅需要解决求解区域随着树脂的注入不断发生变化的问题, 而且需要有效解决树脂流场、压力场、温度场及固化度场互相耦合的难题, 因此树脂流动行为的数值模拟具有相当的难度<sup>[12-13]</sup>。目前常用的数值模拟方法有: 有限元控制体积法、贴体坐标/有限差分法、纯有限元法和边界单元法等<sup>[13, 18]</sup>。有限元控制体积法非常适合模拟复杂边界条件下的流动, 且不需要对界面进行网格的重新划分, 但程序不易编制, 计算过程复杂, 对树脂流动前沿跟踪不准确; 贴体坐标/有限差分法采用网格再生技术, 程序相对易于编制, 但不适于求解动边界问题; 纯有限元法和边界单元法因难以解决树脂流动前锋变化的问题而较少使用。

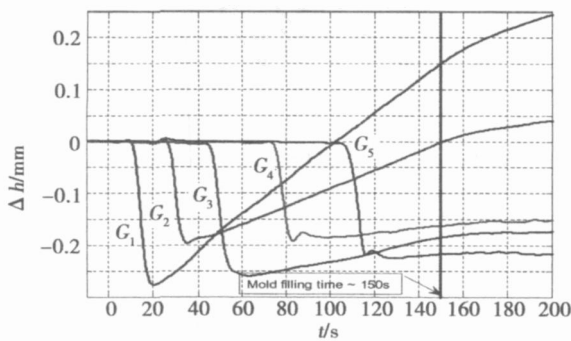
国内外多以 RTM 工艺的数值模拟软件来模拟 VMP 工艺的树脂流动行为, 基于上述数值模拟方法开发此类软件有如 FLUENT 公司开发的 Polyflow, Delaware 大学的 LMS, 密歇根州立大学的 LMPC, 福特公司开发的 CFL, 北京航空航天大学 BHRIM 和 VLCM, 武汉理工大学的 LCMSM, R. Gauvin 等开发的 RTMFLOT 软件。但是, 由于两种工艺的工艺和边界条件不同, RTM 工艺的模拟模型和方法不能准确模拟 VMP 工艺树脂的流动行为。

主要有三个原因<sup>[2, 5]</sup>。(1) RTM 工艺数值模拟是基于刚性边界条件建立的, 注射过程中, 预成型体的厚度不变 (模具刚度足够), 假设纤维体积分数恒定 (忽略非厚度方向变形); 而 VMP 工艺只有单面刚性模具, 另一面模具为柔性真空袋膜, 树脂注射过程中预成型体的厚度发生变化 (图 3<sup>[19]</sup>), 纤维体积分数也随之变化, 因此刚性边界条件不适用于 VMP 工艺的数值模拟。(2) VMP 工艺需要利用导流介质来提高树脂的充模流动速度, 而导流介质的加入不仅可以提高树脂的充模流动速率, 而且改变了树脂的流动模

式,但是 RTM 工艺的数值模拟并未考虑导流介质的作用,因此应用 RTM 工艺的流动模型来描述 VMP 工艺存在较大偏差。(3)VMP 工艺过程中,为了抽走多余的树脂保证一定的纤维体积分数,实现浸渍在微观层面上的进一步均匀化和保持固化过程中的压应力,停止导入树脂后,仍然需要继续抽真空保压至树脂完全固化,这称为 VMP 工艺的后注射过程,该过程是树脂继续细化、均匀化浸渍纤维的过程,而 RTM 工艺基本可以忽略此过程。



(a) 厚度测量装置



(b) 厚度测量结果

图 3 VMP 工艺注射过程中预成型体厚度变化

Fig 3 Changes of thickness in VMP

针对上述问题,国外的学者进行了一些研究,取得了一些进展。Chensong Dong<sup>[6]</sup>应用二次衰退模型研究双重渗透性多孔介质(导流介质和预成型体)的三维流动,以及探索 VMP 工艺的数值模拟和优化设计;P. Simacek<sup>[20]</sup>, Y. S. Song<sup>[21]</sup>等人建立 VMP 工艺后注射过程的控制模型和探索此过程的数值模拟,并研究了后注射阶段的影响因素和浸润机理,以及厚度的变化规律;B. Yenimez 等人<sup>[19]</sup>考察了 VMP 工艺注射过程中预成型体厚度的变化规律。目前的主流仍然是使用 RTM 工艺数值模拟平台来模拟仿真 VMP 工艺的树脂流动行为,这势必存在偏差。

### 3 真空导入模塑工艺树脂流动行为的监测控制

树脂流动行为的监测控制,是保证树脂充分浸渍增强材料,规避制品缺陷的关键技术,可分为过流控制、被动控制和主动控制 3 种<sup>[22~23]</sup>。

过流控制指观察树脂流动前沿到达抽气口后仍然继续注胶一段时间,以使树脂充分浸渍预成型体的

控制方法。原理是导流介质导致树脂在预成型体上下表面的流动速率存在较大差距,过流控制可以减小这种差距带来的负面作用,增加浸渍的均匀化和降低相应缺陷形成的机率。但过流控制可能会导致大量树脂从抽气口抽走而造成制品局部缺胶现象和成本增加。过流控制的难点在于继续注胶时间的控制和防止过抽缺胶,这方面的研究鲜有报道。

被动控制是依据数值模拟结果,优化设计注胶口、抽气口、树脂通道和真空通道等工艺参数达到控制树脂流动行为的方法。被动控制以数值模拟为基础,优化设置工艺流道规范树脂的流动行为,控制方法相对简单、有效。被动控制的局限在于边界条件、工艺参数和材料属性的复杂性往往超出数值模拟的能力范围,边缘和流道效应等不稳定流动很容易造成被动控制的局部或全局监控失败。而且,被动控制一旦树脂开始注射,即使发现缺陷也难以及时调整。

主动控制则是采用先进监控技术实时采集和分析树脂流动行为信息,并对树脂流动行为进行实时调整的控制方法(图 4)。

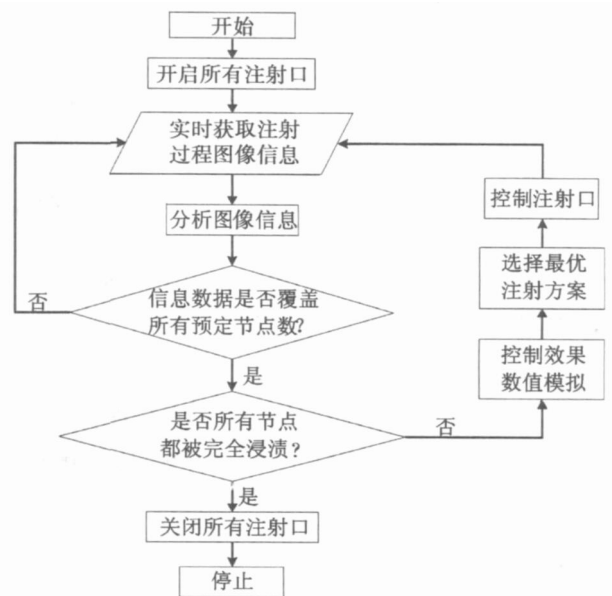


图 4 主动控制流程图

Fig 4 Flow-chart of active control system

实时监测包括流动传感技术、流动模拟和计算机优化等技术,即通过流动传感技术获得树脂流动的实时信息,根据采集的信息模拟分析树脂的流动趋势并通过计算机优化设定下一步采取的控制方法。实时控制可结合计算机技术通过控制注射压力和流动速率<sup>[24]</sup>,或者树脂体系的黏度和注射口的流速<sup>[25]</sup>来达到实时控制的目的。其中,常用的流动传感检测技术有压力传感检测<sup>[26]</sup>、微波传感检测<sup>[27]</sup>、光纤传感检测<sup>[28]</sup>和数码摄像检测<sup>[29~30]</sup>等。例如,M. Dhiren 等人<sup>[22]</sup>采用数字成像仪采集树脂流动浸渍信息,结合

神经网络、数值模拟等技术分析采集信息,通过控制注射口流速实现树脂流动行为的实时控制。实时主动控制属于精益控制,其优点是可以根据需要实时调整树脂注射浸渍的进程,保证树脂充分浸渍增强材料,弥补被动控制过于粗糙和被动的缺点;但对大型复合材料构件的成型,所需要采集和分析的实时信息过于庞大,所需的技术成本也会随之增加。

#### 4 结语

近年来有关真空导入模塑工艺树脂流动行为的研究已经取得了显著的成果,包括流动模型、数值模拟和流动监控等研究,但这方面的研究多以恒黏度假设为基础,对于具有复杂化学流变特性的树脂微观流动行为研究较少。另外,实际工艺中,往往是导流介质和开槽夹芯材料同时使用,导流介质的渗漏流动和槽孔的等效渗流同时存在,树脂的流动行为更加复杂,这方面的研究无论是流动机理还是相应的数值模拟、流动控制都是空白,然而这方面的研究成果恰恰是指导实际工艺生产最为关键的技术,特别是大型复合材料构件的整体成型。因此,真空导入模塑工艺树脂流动行为的研究还有待进一步开展。

#### 参考文献

- 1 Brouwer W D, van Hept E C F C, Laborus M. Vacuum injection moulding for large structural applications *Composites Part A*, 2003; 34: 551 ~ 558
- 2 杨金水,肖加余,曾竟成等.真空导入模塑工艺树脂流动规律研究. *宇航材料工艺*, 2007; 37(5): 22 ~ 26
- 3 Summerscales J, Searle T J. Low pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures *Journal of Materials: Design and Applications*, 2005; 17: 45 ~ 58
- 4 Zhu Yingdan, Tan Hua, Wang Jihui Molding filling analysis in vacuum infusion molding process based on a high permeable medium. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003; 19(5): 467 ~ 471
- 5 Correia N C, Robitaille F, Long A C. Analysis of the vacuum infusion moulding process: I Analytical formulation *Composites Part A*, 2005; 36: 1 645 ~ 1 656
- 6 Dong Chensong Development of a process model for the vacuum assisted resin transfer molding simulation by the response surface method *Composites Part A*, 2006; 37: 1 316 ~ 1 324
- 7 孔祥言.高等渗流力学.合肥:中国科学技术大学出版社, 1999
- 8 伍悦滨,朱蒙生.工程流体力学.北京:化学工业出版社, 2005
- 9 古托夫斯基 T. G 先进复合材料制造技术.北京:化学工业出版社, 2004
- 10 拉德 C D,朗 A C,肯德尔 K N.复合材料液体模塑成型技术.北京:化学工业出版社, 2004
- 11 贝尔.多孔介质流体动力学.北京:中国建筑工业出版社, 1998
- 12 李海晨.树脂传递模塑工艺过程数值模拟与固化过程监测研究.哈尔滨工业大学博士学位论文, 2002

- 13 戴福洪.树脂传递模塑工艺有限元模拟与树脂流动过程监测.哈尔滨工业大学博士学位论文, 2004
- 14 Sun Xiudong, Li Shoujie, Lee L J. Molding filling analysis in vacuum assisted resin transfer molding *Polymer Composites*, 1998; 19(6): 807 ~ 817
- 15 Hammani A, Gebart B R. Experimental investigation of the vacuum infusion process *Proceedings of ECCM - 8*, 1998
- 16 Hammani A. Permeability assessment for the vacuum infusion molding process *ICCM13*, 2001: D - 1059
- 17 Mathur R. Flow front measurements and model validation in the vacuum assisted resin transfer molding process *Polymer Composites*, 2001; 22(4): 477 ~ 490
- 18 彭超义,曾竟成,肖加余. RTM 工艺数值模拟技术研究进展. *宇航材料工艺*, 2003; 33(4): 1 ~ 5
- 19 Yenimez B, Senan M, Sozer E M. Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process *Composites Science and Technology*, 2009; 69(11 ~ 12): 1 710 ~ 1 719
- 20 Simacek P, Advani S G Modeling resin flow and fiber tow saturation induced by distribution media collapse in varim. *Composites Science and Technology*, 2007; 67(13): 2 757 ~ 2 769
- 21 Song Y S, Jeong T T Computational analysis and simulation of vacuum infusion molding process *ICCS 2006, Part*, LNCS3993, 2006: 113 ~ 119
- 22 Dhiren M, Nuno C, Michael J et al Active control of the vacuum infusion process *Composites Part A*, 2007; 38: 1 271 ~ 1 287
- 23 Bickerton S, Stadefeld H, Steiner K et al Design and application of actively controlled injection schemes for resin transfer molding *Composites Science and Technology*, 2001; 61(11): 1 625 ~ 1 637
- 24 Mogavero J, Sun J, Advani S A nonlinear control method for resin transfer molding *Polymer Composites*, 1997; 18(3): 412 ~ 417
- 25 Lee C, Rice B, Buczek M et al Resin transfer molding process monitoring and control *Proceedings of International SAMPE Symposium and Exhibition*, 1998; 43(3): 231 ~ 242
- 26 Lynch K, Hubert P, Poursartip A. Use of a simple inexpensive pressure sensor to measure hydrostatic resin pressure during processing of composite laminates *Polym. Compos*, 1999; 20(4): 581 ~ 593
- 27 Vaidya U, Jadhav N, Hosur M et al Assessment of flow and cure monitoring using direct current and alternating current sensing in vacuum assisted resin transfer molding *Smart Mater Struct*, 2000; 9(6): 727 ~ 736
- 28 Bemstein J, Wagner J. Fiber optic sensors for use in monitoring flow front in vacuum resin transfer molding process *Rev Sci Instrum*, 1997; 68(5): 2 156 ~ 2 157
- 29 Nielsen D, Pitchumani R. Control of flow in resin transfer molding with real-time permeability estimation *Polym. Compos*, 2002; 23(6): 1 087 ~ 1 110
- 30 Nielsen D, Pitchumani R. Closed-loop flow control in resin transfer molding using real-time numerical process simulations *Composites Part A*, 2002; 62(2): 283 ~ 298

(编辑 吴坚)

<http://www.yhclgy.com> 宇航材料工艺 2010年 第1期